
UV 101: Desinfección Ultravioleta, una perspectiva general

Escrito para IUVA por:

Kari Sholtes, Ph.D.

Richard Simons, Ph.D.

Sara E. Beck, Ph.D.

Babak Adeli, Ph.D.

Zhe Sun, Ph.D.

Traducido al español por: Carolina Ontiveros, Ing, M.Sc y Pablo Fredes Dr. Ing.

Conceptos Clave

- La luz ultravioleta (UV) puede ser producida de manera natural y artificial.
- El UV puede ser subdividido en varias categorías, incluyendo UV-A, UV-B, UV-C, y Vacuum UV (UV de vacío). Cuanto menor es la longitud de onda, mayor es la energía del fotón UV.
- La luz UV es un desinfectante efectivo, que rompe los enlaces que forman la estructura del genoma de los microorganismos. Este daño inhibe los procesos normales de replicación y reparación, esto hace posible que las infecciones puedan ser prevenidas.
- La capacidad de la luz UV para inactivar microorganismos (incluyendo virus) depende de: la intensidad (irradiancia) de la fuente de luz UV, la distancia entre la fuente de luz y el objetivo a desinfectar, el tiempo de exposición, la influencia del aire, agua o entidad en el ambiente que pueda disminuir la propagación de la energía UV, la susceptibilidad de los microorganismos a la radiación UV y la longitud de onda aplicada.

Introducción

La luz ultravioleta (UV) es usada comúnmente como desinfectante. Esta inactiva microorganismos (incluyendo virus) mediante la degradación de su material genético y su estructura molecular, provocando que estos no puedan ser infecciosos. La luz UV es comúnmente usada para desinfección de agua, aire y superficies; sin embargo, las longitudes de onda mas efectivas inactivando microbios son también las más dañinas para la piel y los ojos de las personas. Este articulo entrega un resumen básico de la tecnología de desinfección UV, y está orientado al público en general.

¿Qué es la luz UV?

La luz puede ser descrita como una onda, o como una partícula, esto es conocido como la dualidad onda-partícula. Como partícula es llamada fotón, que es una partícula sin masa que transporta energía lumínica a través del universo a la velocidad de la Luz. Como una onda, la energía es irradiada mediante oscilaciones del campo electromagnético. En el espectro electromagnético la radiación UV se sitúa hacia el lado de las ondas cortas, en el rango entre los 100 y 400nm. Este rango UV a la vez se subdivide en cuatro categorías: UV-A (315 nm – 400 nm), UV-B (280 nm – 315 nm), UV-C (200 nm – 280 nm), UV de vacío (100 – 200 nm); se le llama “de vacío” por su gran absorción incluso en el aire.

El UV-A es el que produce el bronceado en la piel y es usado en salones de bronceado de la piel (Nilsen et al. 2016) y también en el proceso de curado de revestimientos de resinas, tinta, adhesivos y esmaltes para las uñas (Endruweit 2006). La energía transportada por la luz es inversamente proporcional a la longitud de onda de esta, es decir, a menor longitud de onda más energética es la luz. Por esta razón el UV-B al ser de longitud de onda menor al UV-A presenta mas riesgos de provocar cáncer a la piel en los seres humanos (NTP, 2016). La radiación en el rango UV-C posee aún mas energía y es comúnmente usada para desinfectar. En la mayoría de los microorganismos la máxima absorción de energía UV se ubica en un valor cercano a 265 nm, por esta razón todas las aplicaciones germicidas deben usar luz UV cuya longitud de onda esté cerca de este valor.

Fuentes de luz UV

Tal como otros tipos de luz pertenecientes al espectro electromagnético, la luz UV puede ser producida naturalmente o de manera artificial. Luz UV natural proviene del sol, y una parte de esta es capaz de tocar la superficie terrestre y otra parte es absorbidas por la atmosfera. Debido a la gran absorción en la atmosfera de radiaciones de alta energía, casi nada de UV-C es capaz de llegar a la superficie de la tierra (ASTM G-173 2020). Además, el espectro de radiación solar varía en distintos puntos de la superficie terrestre.

La luz UV artificial es producida principalmente por lámparas de descarga y diodos emisores de luz (LEDs), además es emitida en algunos casos de modo no intencional en procesos donde se produce arco eléctrico (soldadura al arco). Las lámparas de descarga contienen una mezcla de gas al interior de un tubo de vidrio. Cundo un voltaje apropiado es aplicado entre los filamentos de la lámpara, el gas se vuelve conductor (plasma). Los electrones que comienzan a moverse a través del plasma excitan a los átomos de este, provocando que sus electrones suban a un estado energético mayor, cuando estos decaen a un estado energético base, la energía remanente del proceso es liberada como un fotón UV, es decir un cuanto de energía. El espectro de luz emitida depende de los elementos componentes del gas dentro de la lámpara. Las lámparas de descarga más comunes contienen vapor de mercurio, de haluro metálico, de xenón (UV pulsado). También se encuentran las lámparas de excimer y de exiplex y las lámparas de deuterio.

Los diodos emisores de luz ultravioleta (UV light emitting diode) o UV LED son dispositivos semiconductores de estado sólido ¹. Al aplicar un voltaje al LED, los electrones del material son inducidos a travesar las bandas energéticas (barreras) propias de la estructura cristalina del sólido, que se compone de diferentes capas portadoras de carga. Una vez atravesadas estas bandas energéticas, los electrones pueden liberar la energía sobrante (antes requerida para atravesar las bandas) mediante la emisión de un fotón. La elección del material semiconductor a utilizar para producir un LED determina el tamaño de la banda energética y por ende la longitud de onda del fotón emitido. Los UV LEDs que se comercializan están compuestos por estructuras cristalinas hechas mediante una combinación de nitruro de galio y aluminio (AlGaN: alimnium gallium nitride) depositadas sobre una base sólida llamada substrato (zafiro o nitruro de aluminio); la proporción de

¹ Semiconductores de estado sólido es el nombre que se le da a un tipo de materiales con los que se fabrican una gran variedad de dispositivos electrónicos, diodos, transistores, sensores, etc.

aluminio y galio presente en las capas determina el ancho de las bandas energéticas, y en consecuencia determina la longitud de onda emitida por el LED.

¿Cómo inactiva los microorganismos la luz UV?

El UV-C y el UV-B tienen un efecto de desinfección directa cuando su energía es absorbida por el material genético (limitando su replicación) o por otros componentes celulares o virales como proteínas (limitando la transmisión y la infectividad). Los fotones pertenecientes a los rangos UV-C y UV-B pueden actuar directamente en los enlaces químicos de biomoléculas clave en los microorganismos, alterando su estructura y sus funciones. Cuando el DNA y/o el RNA absorbe fotones UV-B y UV-C, el daño resultante en estos es capaz de inhibir la capacidad de replicación de los microorganismos, haciendo que estos ya no sean infecciosos (Harm 1980).

La luz UV también puede causar una inactivación indirecta de los microorganismos, pero a tasas menores que las provocadas por el UV-C y el UV-B. La luz UV-A habilita la desinfección, y lo hace mediante la activación de los componentes naturales en el agua o en las células objetivo, lo que genera una alta concentración de especies químicas reactivas, como los radicales hidroxilos (Lester et al., 2013); estas especies reactivas pueden causar la degradación de los componentes químicos que podrían no ser afectados directamente por la fotólisis UV. A pesar de que la tasa de desinfección del UV-A es menor que la causada por el daño directo de la radiación UV-B y UV-C, este no puede ser descartado como una tecnología útil, debido a la abundancia de UV-A natural proveniente del sol (Besaratnia et al 2011).

Considerando que el efecto germicida del UV afecta a cada tipo de microorganismo y a sus componentes de manera diferente; aplicar luz UV con varias longitudes de onda a un objetivo (agua, aire o superficie) que contenga múltiples tipos de microorganismos, podría ser considerada como una mejor estrategia, comparada con la aplicación de luz que contenga una sola longitud de onda.

La habilidad de los microorganismos patógenos de replicarse es crucial para la infección o invasión, por lo tanto, una buena manera de medir la eficacia de un proceso de desinfección con UV es midiendo la replicación antes y después de la aplicación de UV. Se define la inactivación microbiana como la reducción en la concentración de microorganismos cultivables (N_t) desde un valor de concentración inicial (N_0), producida por la exposición a un desinfectante durante un periodo de tiempo. (Hijnen et al, 2006). La escala de valores log₁₀ es comúnmente usada para expresar las tasas de inactivación, por ejemplo, 1-log (90%), 2-log (99%), 3-log (99.9%), o 4-log (99.99%). El uso de métodos estandarizados, que se describen más abajo, permite definir la llamada “dosis de reducción equivalente” (RED, por sus siglas en inglés), que tiene unidades de mJ cm^{-2} y cuyo valor empírico puede ser usado para estimar el desempeño germicida de los sistemas UV.

Luz UV para desinfección de fluidos y superficies.

La luz UV puede inactivar microbios en aire, superficies (incluyendo superficies de trabajo, alimentos, productos farmacéuticos y envases), agua y otros líquidos. La desinfección química o física (ej. calor) requiere una determinada concentración y tiempo de exposición o temperatura para alcanzar un objetivo de inactivación de un microorganismo. De manera similar, la eficacia de la desinfección UV es gobernada por el grado de exposición del microorganismo de interés a la luz UV.

Además, la longitud de onda de la radiación UV y las características propias del microorganismo también afectan la eficacia de la desinfección.

El grado de exposición a UV es expresado como la potencia irradiada por unidad de área en un tiempo dado (mJ cm^{-2}), aunque comúnmente es conocido como “dosis UV” el término “fluencia UV” es más correcto de usar cuando se habla de tratamiento de agua o aire; esto es la cantidad de luz UV entregada a un objetivo. La dosis UV es el producto de la irradiancia UV y el tiempo de exposición, esto significa que una alta dosis UV podría ser aplicada aumentando la intensidad de luz UV (irradiancia), el tiempo de exposición o ambos.

En los sistemas del mundo real, cualquier microorganismo individual no necesariamente recibirá la misma dosis UV que otro durante la exposición a la luz. Para el caso de los fluidos (en general aire y agua), la aplicación de luz UV (irradiancia) a un volumen específico no es siempre homogénea, dadas las diferentes trayectorias en el fluido a través del dispositivo. En el caso de las superficies, esto es debido a la distribución no homogénea de la luz en la superficie de interés. Cuando observamos el desempeño general de un sistema, se medirá una inactivación promedio (en escala logarítmica). En una prueba aparte, usando equipos correctamente calibrados, donde la irradiancia y el flujo puedan ser controlados herméticamente, es posible desarrollar curvas de dosis-respuesta, las que permiten ver la capacidad de inactivación real en escala logarítmica, para una serie de muestras previamente preparadas a las que se aplican diferentes valores de dosis UV. Comparando la medición de inactivación promedio en la prueba de calibración, es posible asignar una RED. Este es el promedio de dosis UV requerida para alcanzar una inactivación equivalente como la que fue medida en el sistema.

La RED de un sistema UV puede ser estimada mediante una simulación. La generación y distribución espacial de la luz UV desde sus fuentes es por naturaleza un problema complejo. La propagación de la luz en un sistema de desinfección requiere una detallada y precisa descripción de las numerosas interfaces ópticas y sus características geométricas. Adicionalmente, los fluidos pueden tener turbiedad, provocando que la luz sea dispersada; además las trayectorias en el fluido afectan fuertemente los tiempos de residencia, pudiendo estos ser turbulentos y provocar vórtices en los cuales parte del fluido puede quedar atrapado. Incluso en el caso de irradiación de superficies que es relativamente más simple que los fluidos, las superficies rugosas pueden introducir efectos de sombra que deben ser considerados. Parámetros como la humedad han mostrado un efecto considerable en la capacidad de inactivación de microorganismos en la superficie. Además, la inactivación de la misma especie de microorganismo puede variar de una longitud de onda a otra. Por ejemplo, la inactivación del adenovirus es 16 veces mayor a 210 nm que a 254 nm (Beck et al. 2014). Sistemas similares pueden causar efectos germicidas dramáticamente diferentes dependiendo del microorganismo objetivo, ya que la susceptibilidad a la radiación UV depende de cada microorganismo (Beck et al., 2015). Por ejemplo, los huevos de gusanos parásitos poseen una alta capacidad de resistir a la radiación UV, en cambio los protozoos como *Giardia* y *Cryptosporidium* son altamente susceptibles al UV (Hijnen et al, 2006). El bacteriófago T4 es el virus con mayor susceptibilidad conocida hasta ahora, el cual es alrededor de 75 veces más susceptible que el virus más resistente conocido (Infectious Pancreatic Necrosis Virus, IPNV), ambos bajo radiación UV de 254 nm (Malayeri et al. 2016). Típicamente las bacterias son altamente susceptibles a la radiación UV, aunque extremófilos como el *D. radiodurans* pueden ser unos cuantos ordenes de magnitud más resistentes (Pogoda 2005).

La longitud de onda es otra característica que debe ser considerada. Como se discutió anteriormente, diferentes longitudes de onda (UV-A, UV-B, UV-C) pueden causar diferentes reacciones fotoquímicas y diferentes procesos celulares en los microorganismos. Sin embargo, aún dentro de estos rangos la eficiencia de estas reacciones fotoquímicas varía. Esta variación de eficiencia es descrita por el “espectro de acción germicida”, o sensibilidad espectral del microorganismo objetivo, y aunque la susceptibilidad cambia entre diferentes microorganismos, una característica común que tienen todos ellos, y es que todos muestran una mayor susceptibilidad alrededor de los 265 nm. Esto puede verse en un gráfico de susceptibilidad UV versus longitud de onda, donde el pico alrededor de los 265 nm se puede ver, el cual decrece hasta acercarse a cero hacia los 300 nm, y decae alrededor de un 50% cerca de los 240 nm. Algunos microbios, especialmente virus, muestran un gran incremento en su susceptibilidad UV en la longitud de onda más cortas del rango UV-C (Beck et al. 2014), lo que ha hecho aumentar el interés en el potencial del llamado “UV lejano” (far UV) para la desinfección (Simons et al. 2020).

Seguridad

Al igual que la capacidad de desinfectar, los riesgos asociados a la radiación UV varían según la longitud de onda y el tiempo de exposición. Los peligros asociados a cada fuente de luz UV deben ser considerados siempre antes de usarlas, un fabricante de buena reputación deberá incluir una guía de uso seguro.

Para el uso de fuentes de luz UV “germicida”, se deben establecer protocolos de seguridad que aseguren la protección de cualquier persona que pudiese ser expuesta a UV. La radiación UV es dañina para la piel y ojos, por lo tanto, se requiere un apropiado equipo de protección personal (EPP); los síntomas comunes presentados por daños a la piel son similares a las quemaduras solares, además de eritema², los daños a los ojos se manifiestan con picazón y dolor (fotoqueratitis). Estudios recientes indican que el UV-C lejano (200 – 225 nm) puede proporcionar efectos germicidas sin causar daños a la piel ni a los ojos. La International Ultraviolet Association (IUVA) publicó un artículo que revisa esta tecnología (Simons et al. 2020).

Trabajar de manera segura con UV significa conocer las características físicas de las fuentes de luz (longitud de onda, potencia, distancia), las características químicas del objetivo (generación de ozono, degradación de los materiales, componentes volátiles), y las condiciones de exposición. Como medida de seguridad se deben seguir todos los protocolos y/o lineamientos institucionales y en caso de dudas, evitar siempre la exposición innecesaria de personas a la radiación UV y cubrir apropiadamente toda la piel de los operarios. Es posible encontrar una discusión más completa acerca de la seguridad en el uso de radiación UV en las normas CIE 187:2010 (CIE, 2010), 2006/25/EC (European Parliament, 2006), y la US NTP 14th Report on Carcinogens (NTP, 2016).

REFERENCES

² Inflamación con presencia de lesiones rojas y abultadas con aspecto de diana distribuidas de forma simétrica por el cuerpo.

ASTM G173-03, Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org

Beck, S. E., Rodriguez, R. A., Linden, K. G., Hargy, T. M., Larason, T. C., & Wright, H. B. Wavelength dependent UV inactivation and DNA damage of adenovirus as measured by cell culture infectivity and long range quantitative PCR. *Environ Sci Technol*, 48(1), 591-598. (2014),

Beck, S.E.; Wright, H.B.; Hargy, T.M.; Larason, T.C., Linden, K.G. Action spectra for validation of pathogen disinfection in medium-pressure ultraviolet (UV) systems. *Water Res.* 70, 27-37. (2015).

Besaratinia A., Yoon J.I., Schroeder C., Bradforth S.E., Cockburn M., Pfeifer G.P. Wavelength dependence of ultraviolet radiation-induced DNA damage as determined by laser irradiation suggests that cyclobutane pyrimidine dimers are the principal DNA lesions produced by terrestrial sunlight. *FASEB J* 25:3079–3091 (2011).

CIE (International Commission on Illumination) UV-C Photocarcinogenesis risks from germicidal lamps (2010)

CIE 187:2010. [http://files.cie.co.at/cie187-2010%20\(free%20copy%20March%202020\).pdf](http://files.cie.co.at/cie187-2010%20(free%20copy%20March%202020).pdf)

Endruweit A, Johnson M.S., and Long A.C. Curing of composite components by ultraviolet radiation: A review. *Polymer composites* 27, 119-128 (2006).

European Parliament, Consolidated text: Directive 2006/25/EC of the European Parliament and of the Council of 5 April 2006 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to risks arising from physical agents (artificial optical radiation) (19th Individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC).
<http://data.europa.eu/eli/dir/2006/25/2019-07-26>

Harm W. Biological effects of ultraviolet radiation. United Kingdom: University Press (1980).

Hijnen, W. A. M., Beerendonk, E. F. & Medema, G. J. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: A review. *Water Res.* 40, 3–22 (2006).

Lester Y., Sharpless C.M., Mamane H. & Linden K.G. Production of photo-oxidants by dissolved organic matter during UV water treatment. *Environ Sci Technol* 47, 11726–11733 (2013).

Malayeri A.H., Mohseni M., Cairns B., Bolton J.R., Chevrefils G., Caron E., Barbeau B., Wright H. and Linden K.G. Fluence (UV dose) required to achieve incremental log inactivation of bacteria, protozoa, viruses and algae. *IUVA News* 18(3): 4-6 (2016).



International Ultraviolet Association
6935 Wisconsin Avenue, Suite 207
Chevy Chase, MD 20815
www.iuva.org

Nilsen L.T., Hannevik M., Veierød M.B. Ultraviolet exposure from indoor tanning devices: a systematic review. *Br J Dermatol*; **174**(4), 730-740 (2016).

NTP (National Toxicology Program). Report on Carcinogens, Fourteenth Edition.; Research Triangle Park, NC: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. (2016) <https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/roc/content/profiles/ultravioletradiationrelatedexposures.pdf>

Pogoda De La Vega U., Rettberg P., Douki T., Cadet J. & Horneck G. Sensitivity to polychromatic UVradiation of strains of deinococcus radiodurans differing in their DNA repair capacity. *International Journal of Radiation Biology*, 81:8, 601-611 (2005).

Simons R.M., Blatchley III E.R., Linden K.G. Far UV-C in the 200 – 225 nm range, and its potential for disinfection applications, IUVA, (2020). Accessed online 28/07/2020 <https://bit.ly/2ZyIAkc>